

◆特邀栏目◆

广西农业生态经济系统安全评价与预警研究*

张云兰^{1,2,3}

(1. 广西财经学院经济与贸易学院, 广西南宁 530003; 2. 广西财经学院广西金融与经济研究院, 广西南宁 530003; 3. 中国-东盟数字经济学院, 广西南宁 530003)

摘要:开展长时间序列的广西农业生态经济系统安全评价、安全影响因素和安全预警研究,可为系统安全调控、农业可持续发展和乡村振兴提供决策参考。本研究采用生态足迹模型核算2000-2021年广西农业生态经济系统人均生态足迹和人均生态承载力,通过资源利用效率指数、生态盈亏、生态压力指数评价系统安全状况,利用偏最小二乘(PLS)模型分析系统安全的影响因素,基于灰色GM(1,1)模型开展系统安全预警,并将预警结果与云南、贵州进行比较。结果表明,2000-2021年广西农业生态经济系统人均生态足迹增长90.30%,其中林地增长最快,耕地占比最大;人均生态承载力下降0.67%;系统资源利用效率提高72.97%,但2011年以来增幅较小;系统生态赤字从-0.395 hm²/人不断加剧到-1.292 hm²/人,生态压力指数从1.66升高到3.18,系统中度不安全状态逐渐转变为重度不安全状态,并开始进入极度不安全状态;人均耕地面积和耕垦指数对系统安全具有正向影响;2022-2033年系统安全由重警转为巨警,警情等级高于贵州和云南。因此,要提高耕地保护力度,促进农业转型升级,保障广西农业生态经济系统安全。

关键词:农业生态经济系统;生态足迹模型;安全评价;安全预警;广西

中图分类号:F062.2 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2023)05-0961-11

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20231121.015

农业生态经济系统是农业生态系统与农业经济系统相互融合的生态经济复合系统,内部种植业、林业、畜牧业和渔业4个农业生态子系统之间,以及4个农业生态子系统与工业、服务业之间不断发生着经济联系^[1]。农业生态经济系统安全是区域生态安全和可持续发展的重要保障。广西地处西南喀斯特地

区,是世界上最大的喀斯特连续带,生态环境脆弱,人地矛盾突出,极易陷入“生态脆弱-贫困-掠夺式发展-生态经济系统退化-进一步贫困”的恶性循环^[2],是我国农业资源与生态环境保护的重点区域,同时也是我国重要的生态安全屏障。近年来,我国全面推进乡村振兴战略,曾多次强调要加快推行农业绿

收稿日期:2023-10-18

修回日期:2023-11-03

* 国家社会科学基金项目(17CJY008),广西哲学社会科学规划研究课题(22BJY011),广西高等学校千名中青年骨干教师培育计划人文社会科学类项目(2021QGRW058),陆海经济一体化协同创新中心项目(2023XTZX014),应用经济学广西一流学科建设项目(2023XKA13)和统计学广西一流学科建设项目(2022GKYB03)资助。

【第一作者简介】

张云兰(1984-),女,教授,主要从事农业生态经济系统安全研究,E-mail:1002021558@qq.com。

【引用本文】

张云兰. 广西农业生态经济系统安全评价与预警研究[J]. 广西科学,2023,30(5):961-971.

ZHANG Y L. Research on the Safety Evaluation and Early Warning of Guangxi's Agricultural Eco-economic System [J]. Guangxi Sciences,2023,30(5):961-971.

色生产方式,促进农业高质量发展,促进农业生态经济系统安全。因此,在生态安全和乡村振兴视域下,建立广西农业生态经济系统安全评价与预警体系,定量分析系统安全状况和影响因素,动态预测系统安全警情演变趋势,可为广西农业生态经济系统安全调控提供依据,进而推进广西石漠化防治、农业资源与生态环境保护、农业可持续发展,以及乡村振兴和生态文明建设。

1992年,加拿大生态经济学家 Rees^[3]提出采用生态足迹(Ecological Footprint, EF)模型来衡量区域、自然资源的可持续发展,并与其学生 Wackernagel于1996年进一步完善了该方法^[4]。生态足迹模型是通过计算一定区域内人口消费的各种生物资源和能源数量,并按照相应的换算系数折算成生物生产性土地面积,再将土地面积加和之后得到该区域总的生态足迹^[5]。同时,根据区域内耕地、林地、草地、水域、化石能源地、建设用地等6种类型的土地面积计算区域总的生态承载力^[6]。通过比较生态足迹与生态承载力的大小,可判断区域发展是否处于安全、可持续状态。生态足迹模型作为生态安全评价和可持续发展研究的有效方法,得到国内外学者的广泛关注和运用。中国于1999年引入生态足迹模型,学者将其广泛用于区域生态经济系统的定量研究。随着研究区域的不断扩展,徐中民等^[7]计算了1995年张掖地区的生态足迹;翁伯琦等^[8]动态分析了1999-2003年福建生态足迹和生态承载力,提出减少福建生态赤字的对策;潘洪义等^[9]测算了2009-2014年成都生态足迹时空演变规律,发现最严重的生态赤字发生在浦江县;符正平等^[10]研究了中国29个省在2004-2017年的可持续发展能力,发现生态省试点可以抑制人均生态足迹的增加,有效促进区域可持续发展。随着研究的不断深入,一些学者还将生态足迹模型应用到资源可持续利用^[11]、水生态安全^[12]、土地安全^[13]和农业生态安全^[14]等方面。目前,利用生态足迹模型开展生态安全评价的研究较多,而基于生态安全评价结果进一步开展安全预警的研究鲜见,未见有利用生态足迹模型深入开展农业生态经济系统安全评价的研究,尤其是针对生态脆弱区农业生态经济系统安全的长时间序列动态评价和预警还有待进一步研究。因此,本研究采用生态足迹模型测算2000-2021年广西农业生态经济系统生态足迹和生态承载力,定量评价系统的安全状况,在此基础上采用偏最小二乘(PLS)模型分析系统安全的影响因素,

并基于灰色GM(1,1)模型开展系统安全预测和预警研究,以期为系统安全调控和可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

广西地处云贵高原东南边缘,东邻广东省、南邻北部湾、西南与越南毗邻,属亚热带季风气候,年平均气温17.60-23.80℃,年平均降水量723.90-2983.80mm。行政区域土地面积 $2.376 \times 10^5 \text{ km}^2$,其中山地和丘陵面积分别占62.05%和14.49%。根据第三次全国国土调查结果,广西耕地、林地、园地、草地、水域及水利设施用地面积分别为 3.3076×10^6 、 1.60953×10^7 、 1.6703×10^6 、 2.762×10^5 、 $7.49 \times 10^5 \text{ hm}^2$,分别占土地总面积的13.97%、68.00%、7.06%、1.17%和3.16%,人均耕地面积仅 0.07 hm^2 。2022年末,广西常住人口5047万人,其中乡村人口占44.35%。2022年广西GDP达26300.87亿元,其中第一产业增加值4269.81亿元,占比16.2%,粮食、猪牛羊禽肉和水产品产量分别为 1.3931×10^7 、 4.46×10^6 、 $3.638 \times 10^6 \text{ t}^{[15-17]}$ 。

1.2 数据来源

参考文献[18-20],结合研究区概况,本研究以2000-2021年为研究时段,开展基于生态足迹模型的广西农业生态经济系统安全评价与预警,并将得出的结果与贵州、云南进行比较分析。研究数据主要包括生物资源消费量、生物资源全球平均产量、人口、均衡因子、各类土地面积、产量因子等。其中,生物资源消费量、生物资源全球平均产量、人口、各类土地面积等数据来源于经济预测系统(EPS)数据库、联合国粮食及农业组织(FAO)数据库和2001-2022年的《中国统计年鉴》^[21]、《中国农村统计年鉴》^[22]、《广西统计年鉴》^[23]、《云南统计年鉴》^[24]、《贵州统计年鉴》^[25];均衡因子和产量因子采用Wackernagel等^[26]提出的取值方法。

1.3 方法

1.3.1 生态足迹模型

(1)生态足迹

根据国际通用的生态足迹模型^[7],农业生态经济系统的生态足迹计算涉及耕地、草地、林地和水域所对应的生物资源账户,即引用均衡因子将4类生物资源账户的生物资源消费量转化成生物生产性土地^[27],其计算公式如下:

$$EF = N \cdot ef = N \cdot \sum_{j=1}^4 (r_j \cdot aa_j) = N \cdot \sum_{j=1}^4 \left[r_j \cdot \sum_{i=1}^n (a_i) \right] = N \cdot \sum_{j=1}^4 \left[r_j \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{c_i}{p_i} \right) \right],$$

式中, EF 为总生态足迹; N 为总人口数; ef 为人均生态足迹; j 代表 4 种土地类型, 分别是耕地、草地、林地和水域; aa_j 为各类生物生产性土地面积; r_j 为均衡因子, 无量纲, 均衡处理后的 4 类土地面积即为可以相加的世界平均生物生产性土地面积; i 为消费的生物资源账户项目类别; a_i 为第 i 种生物资源账户项目的人均年消费量所折算的生物生产性土地面积; p_i 为第 i 种生物资源账户项目的全球平均产量; c_i 为第 i 种生物资源账户项目的人均年消费量, n 为消费的生物资源账户项目的数量。

本研究的生物资源账户包括 34 个生物资源项目, 即耕地对应的谷物、豆类、薯类、棉花、油料、麻类、甘蔗、蔬菜、烟叶等 9 个项目, 林地对应的茶叶、水果、木材、橡胶、松脂、油桐籽、油茶籽、核桃、板栗、白果、八角、桂皮、茴油、桂油、竹笋干、毛竹采伐量等 16 个项目, 草地对应的猪肉、牛肉、羊肉、禽肉、奶类、禽蛋、蜂蜜、蚕茧等 8 个项目, 以及水域对应的水产品。

(2) 生态承载力

农业生态经济系统的生态承载力是指耕地、草地、林地、水域等 4 种类型土地所能提供给人类的生物生产性土地的面积总和^[27]。生态承载力计算公式如下:

$$EC = N \cdot ec = N \cdot \sum_{j=1}^4 (a_j \cdot r_j \cdot Y_j),$$

式中, EC 为总生态承载力; N 为总人口数; ec 为人均生态承载力; a_j 为人均占有的 j 类生物生产性土地面积, 通常指耕地、林地、草地、水域 4 类; r_j 为均衡因子; Y_j 为 j 类生物生产性土地的产量因子。由于生态足迹模型将水果纳入林产品, 因此本研究中广西林地面积由统计数据中林地和果园面积相加所得。为了保护生物多样性, 需在生物生产性土地面积中扣除 12%。

1.3.2 农业生态经济系统安全评价

(1) 资源利用效率指数

农业生态经济系统的资源利用效率指数是指万元农业 GDP 生态足迹^[28], 反映农业生态经济系统发展对资源的利用效率, 是生态足迹与农业 GDP (第一产业增加值) 的比值, 计算公式如下:

$$REI = \frac{EF}{GDP},$$

式中, REI 为资源利用效率指数; EF 为总生态足迹; GDP 为农业 GDP, 单位为万元; REI 的值越大, 说明系统资源的利用效率越低, 反之则说明利用效率越高^[29]。

(2) 生态盈亏

农业生态经济系统的生态盈亏是指人均生态足迹和人均生态承载力之差^[27], 计算公式为

$$ed = ec - ef,$$

式中, ed 为生态盈亏, 当 $ed > 0$ 时为生态盈余, 表明系统是安全、可持续的; 当 $ed < 0$ 时为生态赤字, 表明系统超载, 是不安全、不可持续的。

(3) 生态压力指数

农业生态经济系统的生态压力指数是农业生态经济系统安全评价的重要指标, 是人均生态足迹和人均生态承载力的比值, 表示系统承受的压力程度^[26,27], 计算公式为

$$EPI = \frac{ef}{ec},$$

式中, EPI 为生态压力指数, 其值越大, 表示系统的压力越大, 越不安全。EPI 可划分为 5 个等级, 分别代表系统安全的 5 个级别, $EPI < 1.0$ 为安全, $1.0 \leq EPI < 1.5$ 为轻度不安全, $1.5 \leq EPI < 2.0$ 为中度不安全, $2.0 \leq EPI < 3.0$ 为重度不安全, $EPI \geq 3.0$ 为极度不安全^[20,30,31]。

1.3.3 农业生态经济系统安全影响因素

农业生态经济系统属于“自然-社会-经济”复合系统, 是受人类控制、以农业生产为主要目标的综合体^[1]。农业生态经济系统安全影响因素分析的指标可分为农业资源指标、农业经济指标和农业社会指标。依据科学性、代表性、可操作性和通行性原则, 结合广西的实际情况, 选取 20 个相关指标构建备选指标集。通过理论分析、部门调研、专家咨询, 最终确定 8 个指标作为广西农业生态经济系统安全影响分析指标体系, 即人口密度和城镇化率代表农业社会指标, 人均农业 GDP、农业经济密度 (农业 GDP 除以农业用地面积)、化肥施用量和农业机械总动力代表农业经济指标, 人均耕地面积和耕垦指数 (耕地面积除以农业用地面积) 代表农业资源指标。

参考徐智超等^[32]和高艳珍等^[33]的研究, 在广西农业生态经济系统安全影响因素分析中选择最典型的生态压力指数代表系统安全状况。因此, 以 2000 - 2021 年广西农业生态经济系统的生态压力指数 (Y) 为因变量, 2000 - 2021 年人口密度 (X_1)、人均

农业 GDP (X2)、人均耕地面积 (X3)、耕垦指数 (X4)、农业经济密度 (X5)、城镇化率 (X6)、化肥施用量 (X7)、农业机械总动力 (X8) 等 8 个指标为自变量, 量化分析广西农业生态经济系统安全影响因素。首先对农业 GDP 进行平减处理, 再利用 PLS 模型进行回归分析。在 PLS 模型分析中, 自变量的回归系数标准化值的绝对值越大说明这个自变量对因变量的影响越大。

1.3.4 农业生态经济系统安全预警

(1) 生态压力指数预测

通过预测 2022 - 2033 年广西农业生态经济系统人均生态足迹和人均生态承载力, 计算出 2022 - 2033 年系统生态压力指数, 以生态压力指数作为警情指数开展广西农业生态经济系统安全预警研究。灰色预测模型是趋势预测的有效方法, 是对在一定范围内变化且变化与时间有关的灰色过程进行动态预

表 1 农业生态经济系统安全警情标准

Table 1 Security warning standard of agricultural eco-economic system

警情区间 Warning range	警度 Warning degree	警度描述 Warning degree description	指示灯 Indicator light
[3, ∞)	Huge alarm	The agricultural eco-economic system has been severely damaged and difficult to recover, which poses a serious threat to the regional population, socio-economic and resource environment	Red
[2, 3)	Severe alarm	The agricultural eco-economic system has been significantly damaged, making it difficult to restore the system, which poses a significant threat to the regional population, socio-economic and resource environment	Orange
[1.5, 2)	Moderate alarm	The agricultural eco-economic system has been greatly damaged, and there are significant difficulties in system restoration, which poses a significant threat to the regional population, social economy, and resource environment	Yellow
[1, 1.5)	Mild alarm	The agricultural eco-economic system has suffered minor damage, and the system functions well. The damage can be restored in a timely manner, which poses a minor threat to the regional population, socio-economic and resource environment	Blue
[0, 1)	No alarm	The agricultural eco-economic system has not been damaged, and the system functions well, coordinating with the regional population, socio-economic and resource environment	Green

2 结果与分析

2.1 生态足迹与生态承载力

2.1.1 人均生态足迹动态分析

2000 - 2021 年广西农业生态经济系统人均生态足迹为 0.990 - 1.884 $\text{hm}^2/\text{人}$, 在时间序列上呈波浪式上升趋势, 2021 年较 2000 年总体上增长 90.30% (图 1)。其中, 2000 - 2021 年林地人均生态足迹增长最快, 且变化趋势与系统较为一致, 增长了 8.64 倍, 主要是由于木材和水果消费快速增加, 促使其人均生态足迹分别增加 7.17 倍和 12.62 倍; 耕地、草地和水域的人均生态足迹增长相对缓慢, 分别增长

测, 该模型的优点是对样本量和概率分布没有严格要求, 运算简便、精度较高、易于检验, 也不用考虑分布规律或变化趋势等, 且对不规律的数据预测效果更好^[34]。GM(1,1) 模型是最常用、最有效的灰色预测模型^[35]。因此, 本研究中采用 GM(1,1) 模型预测广西农业生态经济系统生态压力指数, 分析系统安全警情演变趋势, 并与同属石漠化片区的云南、贵州相比较。

(2) 警情标准划分

参照农业生态经济系统安全等级划分标准, 根据农业生态经济系统的实际情况, 结合相关研究成果^[35]和专家意见, 以生态压力指数预测值来划分警度。本研究将广西农业生态经济系统安全警情划分为巨警、重警、中警、轻警、无警 5 个等级, 并确定相应的警度和指示灯, 如表 1 所示。

32.53%、24.74% 和 39.53%。2021 年, 4 类土地人均生态足迹占系统比重排序为林地 > 耕地 > 草地 > 水域, 分别为 36.84%、34.82%、25.16% 和 3.18%。

2.1.2 人均生态承载力动态分析

2000 - 2021 年广西农业生态经济系统人均生态承载力变化较小, 在 0.592 - 0.718 $\text{hm}^2/\text{人}$ 之间波动 (表 2), 平均值为 0.659 $\text{hm}^2/\text{人}$, 2021 年较 2000 年总体下降 0.67%。2000 - 2021 年林地人均生态承载力增加 36.44%; 耕地和草地人均生态承载力分别减少 0.088、0.001 $\text{hm}^2/\text{人}$, 水域人均生态承载力稳定。耕地和林地的人均生态承载力占系统比重较大, 2021 年占比分别为 45.10%、54.39%。

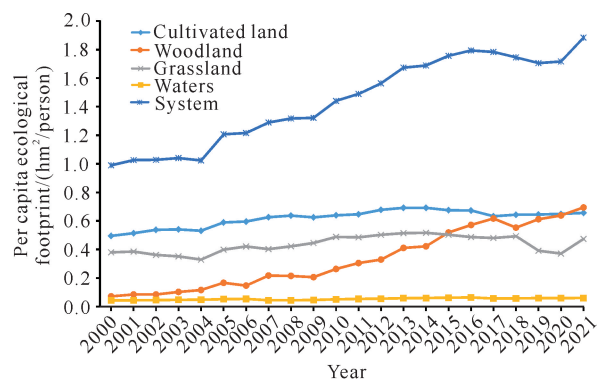


图1 2000-2021年广西农业生态经济系统人均生态足迹

Fig. 1 Per capita ecological footprint of Guangxi's agricultural eco-economic system from 2000 to 2021

表2 2000-2021年广西农业生态经济系统人均生态承载力
Table 2 Per capita ecological carrying capacity of Guangxi's agricultural eco-economic system from 2000 to 2021

Unit: $\text{hm}^2/\text{person}$

年份 Year	耕地 Cultivated land	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Waters	系统 System
2000	0.355	0.236	0.001	0.003	0.596
2001	0.378	0.235	0.001	0.003	0.617
2002	0.354	0.234	0.001	0.003	0.593
2003	0.374	0.233	0.001	0.003	0.611
2004	0.371	0.261	0.001	0.003	0.637
2005	0.390	0.285	0.001	0.003	0.680
2006	0.385	0.282	0.001	0.003	0.671
2007	0.364	0.279	0.001	0.003	0.647
2008	0.361	0.301	0.001	0.002	0.666
2009	0.376	0.300	0.002	0.003	0.681
2010	0.395	0.316	0.002	0.004	0.717
2011	0.392	0.320	0.002	0.004	0.718
2012	0.388	0.318	0.002	0.004	0.712
2013	0.386	0.317	0.002	0.004	0.708
2014	0.382	0.315	0.002	0.004	0.703
2015	0.380	0.314	0.002	0.003	0.699
2016	0.375	0.312	0.000	0.003	0.690
2017	0.370	0.310	0.000	0.003	0.684
2018	0.367	0.309	0.000	0.003	0.679
2019	0.275	0.327	0.001	0.003	0.605
2020	0.270	0.323	0.000	0.003	0.596
2021	0.267	0.322	0.000	0.003	0.592

2.2 系统安全评价

2.2.1 资源利用效率指数分析

2000-2021年广西农业GDP从538.69亿元增加到4015.5亿元,增长6.45倍;广西农业生态经济系统生态足迹从4702.51万公顷增加到9490.07万公顷,增长1.02倍;系统资源利用效率指数从8.73 $\text{hm}^2/\text{万元}$ 波动下降到2.36 $\text{hm}^2/\text{万元}$ (图2),下降72.97%,表明系统资源利用效率提高72.97%,2011年以来,系统资源利用效率提升速度明显放缓。2000-2021年林地资源利用效率指数波动较大,总体下降25.97%,平均值为8.31 $\text{hm}^2/\text{万元}$,大于耕地、草地和水域。综上表明林地资源利用效率在4类土地类型中最低,尽管2021年林地资源利用效率较2000年提高25.97%,但涨幅低于耕地、草地和水域,后三者的资源利用效率分别提高83.99%、74.70%和74.18%。

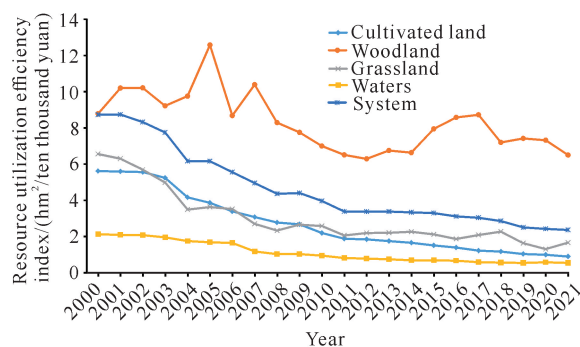


图2 2000-2021年广西农业生态经济系统资源利用效率指数

Fig. 2 Resource utilization efficiency index of Guangxi's agricultural eco-economic system from 2000 to 2021

2.2.2 生态盈亏分析

2000-2021年广西农业生态经济系统处于生态赤字状态,且从 $-0.395 \text{hm}^2/\text{人}$ 不断加剧到 $-1.292 \text{hm}^2/\text{人}$ (图3),表明系统因资源过度消耗出现超负荷运行。其中,林地由2000年生态盈余($0.164 \text{hm}^2/\text{人}$)到2021年生态赤字($-0.373 \text{hm}^2/\text{人}$);耕地、草地和水域一直处于生态赤字状态,并逐渐加剧;生态赤字严重程度为草地>耕地>水域,2021年分别为 -0.473 、 -0.389 、 $-0.057 \text{hm}^2/\text{人}$ 。耕地、林地、草地、水域和系统总体均处于不安全状态,且有不断加剧的趋势。

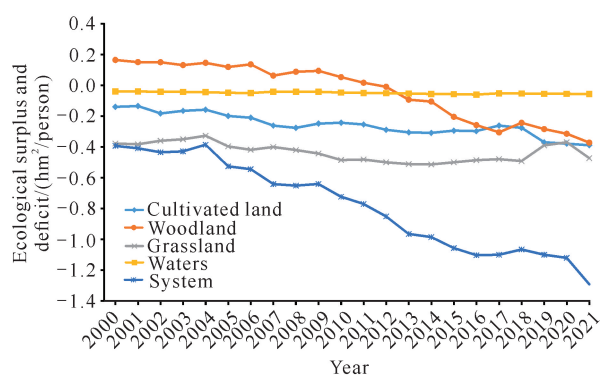


图3 2000-2021年广西农业生态经济系统生态盈亏

Fig. 3 Per capita ecological profit or loss of Guangxi's agricultural eco-economic system from 2000 to 2021

2.2.3 生态压力指数分析

2000-2021年,广西农业生态经济系统及其耕地、林地、草地、水域的生态压力指数均波动升高(表3)。2000-2009年系统生态压力指数为1.5-2.0,处于中度不安全状态;2010-2020年系统生态压力指数为2.0-3.0,处于重度不安全状态,2021年进入极度不安全状态。2000、2001、2003、2004年耕地生态压力指数为1.0-1.5,处于轻度不安全状态;2005-2018年耕地生态压力指数为1.5-2.0,处于中度不安全状态;2019年以来,耕地进入重度不安全状态。2000-2011年林地生态压力指数小于1.0,处于安全状态;随后逐渐从轻度不安全状态转变为中度不安全状态,2021年进入重度不安全状态。2000-2021年草地生态压力指数远高于3.0,且不断升高,处于极度不安全状态,主要原因是草地面积小且急剧减少,同时畜牧产品的消费量大幅增加。2000-2021年水域生态压力指数也高于3.0,且不断升高,处于极度不安全状态。

表3 2000-2021年广西农业生态经济系统生态压力指数
Table 3 Ecological pressure index of Guangxi's agricultural eco-economic system from 2000 to 2021

年份 Year	耕地 Cultivated land	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Waters	系统 System
2000	1.39	0.30	255.65	13.16	1.66
2001	1.36	0.36	260.91	13.59	1.66
2002	1.52	0.36	256.92	13.99	1.74
2003	1.44	0.44	256.26	14.57	1.70
2004	1.43	0.44	244.04	15.10	1.61
2005	1.51	0.58	282.57	15.65	1.78
2006	1.55	0.52	303.77	16.32	1.81
2007	1.72	0.78	295.75	17.57	1.99

续表

Continued table

年份 Year	耕地 Cultivated land	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Waters	系统 System
2008	1.77	0.71	314.43	17.85	1.98
2009	1.66	0.69	212.73	13.35	1.94
2010	1.62	0.83	221.70	14.06	2.01
2011	1.65	0.95	222.09	14.76	2.07
2012	1.75	1.03	232.78	15.47	2.20
2013	1.79	1.30	239.92	16.26	2.36
2014	1.81	1.34	244.21	16.98	2.40
2015	1.78	1.65	239.91	17.67	2.51
2016	1.79	1.83	50 125.33	18.53	2.60
2017	1.71	1.99	49 911.64	16.46	2.61
2018	1.75	1.79	51 617.77	17.05	2.57
2019	2.35	1.87	776.99	20.12	2.82
2020	2.41	1.98	758.89	20.26	2.88
2021	2.46	2.16	985.08	20.73	3.18

2.3 系统安全影响因素分析

广西农业生态经济系统安全影响因素分析的自变量和因变量变化情况如表4所示。2000-2021年因变量Y增长91.57%,自变量X中增长率排前3的分别是人均农业GDP(X2)、农业机械总动力(X8)和农业经济密度(X5)。8个自变量和因变量之间的Pearson相关系数均呈现出0.01水平的显著性(表5),表明指标选择较为合理;部分自变量之间具有显著的相关性,说明存在多重共线性情况。因此,回归分析采用PLS模型较为合适,可以有效解决多重共线性问题^[31,33]。

表4 广西农业生态经济系统安全影响因素分析指标的变化
Table 4 Changes in analysis indicators of factors affecting the security of Guangxi's agricultural eco-economic system

指标 Indicator	代码 Code	年份 Year		增长率/% Growth rate/%
		2000	2021	
Ecological pressure index	Y	1.66	3.18	91.57
Population density/ (person/km ²)	X1	200.04	212.08	6.02
Per capita agricul- tural GDP/(10 000 yuan/person)	X2	1 133.85	3 077.46	171.42
Per capita cultivated land area/(hm ² / person)	X3	0.09	0.06	-33.33

续表

Continued table

指标 Indicator	代码 Code	年份 Year		增长率/% Growth rate/%
		2000	2021	
Cultivation index	X4	17.23	13.73	-20.31
Agricultural economic density/ (10 000 yuan/hm ²)	X5	0.30	0.70	133.33
Urbanization rate/%	X6	28.16	55.08	95.60
Fertilizer application amount/10 000 t	X7	157.80	251.89	59.63
Total power of agricultural machinery/ 10 000 kW	X8	1 467.94	3 886.35	164.75

表 5 指标之间的 Pearson 相关系数矩阵

Table 5 Pearson correlation coefficient matrix between indicators

	Y	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
Y	1								
X1	0.609 * *	1							
X2	0.978 * *	0.519 *	1						
X3	-0.641 * *	-0.795 * *	-0.545 * *	1					
X4	-0.609 * *	-0.677 * *	-0.521 *	0.985 * *	1				
X5	0.540 * *	-0.048	0.652 * *	-0.074	-0.114	1			
X6	0.971 * *	0.530 *	0.994 * *	-0.509 *	-0.473 *	0.633 * *	1		
X7	0.820 * *	0.228	0.895 * *	-0.168	-0.147	0.776 * *	0.913 * *	1	
X8	0.938 * *	0.426 *	0.974 * *	-0.401	-0.372	0.675 * *	0.985 * *	0.941 * *	1

Note: * * represents a significant level less than 0.01, * represents a significant level less than 0.05.

表 6 基于 PLS 模型的回归系数标准化值

Table 6 Normalized values of regression coefficients based on PLS model

指标 Index	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
Coefficient	0.125	0.229	-0.118	-0.108	0.047	0.226	0.155	0.219

农业经济增长是影响广西农业生态经济系统安全的主要因素。农业机械的推广应用提高了农业生产效率,但也给农田水土保持造成一定的破坏;化肥施用量大幅增加,提高了农产品产量,但也造成农业生态环境污染。随着城镇化进程加快,大量农业人口转为非农人口,农业自然资源和生态环境压力逐渐增加。

2.4 系统安全警情分析

根据广西农业生态经济系统生态压力指数(系统安全警情指数)预测结果(表 7)可知,2022-2033 年

如表 6 所示, X3、X4 的回归系数标准化值为负数,表明人均耕地面积和耕垦指数对生态压力指数具有逆向影响,有利于广西农业生态经济系统安全。另外 6 个自变量的回归系数标准化值为正数,表明其值增加会使生态压力指数同步升高,不利于广西农业生态经济系统安全,其影响程度的大小为人均农业 GDP>城镇化率>农业机械总动力>化肥施用量>人口密度>农业经济密度。基于 PLS 模型的回归方程如下: $Y = 0.125 \times X1 + 0.229 \times X2 - 0.118 \times X3 - 0.108 \times X4 + 0.047 \times X5 + 0.226 \times X6 + 0.155 \times X7 + 0.219 \times X8$ 。

系统从重度不安全状态转变为极度不安全状态,且不断加剧,安全警情也从重警演变为巨警,指示灯由橙色变为红色。将广西农业生态经济系统安全警情与云南、贵州作横向比较,可知 2022-2033 年云南、贵州的农业生态经济系统安全警情不断恶化,这与广西的情况一致;贵州农业生态经济系统均处于中度不安全状态,警度为中警,指示灯为黄色;云南农业生态经济系统从中度不安全状态逐渐转变为重度不安全状态,警度由中警演变为重警,指示灯由黄色转变为橙色。总体来说,2022-2033 年广西农业生态经济系

统安全警情较云南、贵州更为严重。

表 7 2022 - 2033 年农业生态经济系统安全警情

Table 7 Security warning of agricultural eco-economic system in 2022 - 2023

年份 Year	广西 Guangxi		云南 Yunnan		贵州 Guizhou	
	警情指数 Warning index	警度 Warning degree	警情指数 Warning index	警度 Warning degree	警情指数 Warning index	警度 Warning degree
2022	2.97	Severe alarm	1.63	Moderate alarm	1.46	Moderate alarm
2023	3.04	Huge alarm	1.68	Moderate alarm	1.48	Moderate alarm
2024	3.12	Huge alarm	1.72	Moderate alarm	1.51	Moderate alarm
2025	3.20	Huge alarm	1.77	Moderate alarm	1.54	Moderate alarm
2026	3.28	Huge alarm	1.82	Moderate alarm	1.57	Moderate alarm
2027	3.35	Huge alarm	1.87	Moderate alarm	1.60	Moderate alarm
2028	3.44	Huge alarm	1.92	Moderate alarm	1.64	Moderate alarm
2029	3.51	Huge alarm	1.97	Moderate alarm	1.67	Moderate alarm
2030	3.60	Huge alarm	2.02	Severe alarm	1.70	Moderate alarm
2031	3.68	Huge alarm	2.07	Severe alarm	1.73	Moderate alarm
2032	3.76	Huge alarm	2.13	Severe alarm	1.76	Moderate alarm
2033	3.85	Huge alarm	2.18	Severe alarm	1.79	Moderate alarm

3 讨论

广西农业生态经济系统人均生态承载力总体上较为平稳,人均生态足迹不断增加且大于人均生态承载力,即系统发展对自然资源的需求和消耗超过系统供给能力,导致生态赤字,系统处于不安全状态,生态压力指数呈上升趋势,这与刘璐瑶等^[11]和杨屹等^[36]的研究结果相似。由于生态足迹模型中的均衡因子、产量因子取值方法不同,以及生物资源账户选取的项目数量不同,生态压力指数大小与杨屹等^[36]的研究结果存在一定差异,但差异较小且总体趋势一致。本研究的生物资源账户项目数量达 34 个,且研究时序长达 22 年,能更全面、更准确地反映广西农业生态经济系统的生态足迹和安全状况。

2000 - 2021 年广西农业生态经济系统中耕地的人均生态足迹占比最大,且人均耕地面积、耕垦指数对系统安全具有较强的正向影响,而人均农业 GDP 和城镇化率对系统安全具有较强的逆向影响。广西素有“八山一水一分田”之称,因此在城镇化进程中,要加快土地整理,扩大耕地面积,加大耕地保护力度,积极落实田长制,优化耕地利用模式,协调人地关系。林地人均生态足迹快速增加,导致系统不安全状态进一步加剧,应坚持“两山”理念,优化林业产业结构,提升林业生态产品价值。草地和水域人均生态足迹占

比较小,但生态压力指数排前 2,主要是因为人民生活水平提高,主要消费结构发生改变,从粮食转变为肉、蛋、奶类,这与柯志成等^[37]的研究结果一致。因此,要坚持草牧平衡规律,积极恢复受损草地的生态功能,改良畜禽品种,发展有特色、高品质和高效益的畜牧业;积极推广生态健康养殖模式,强化养殖尾水治理技术,提高水产养殖业绿色转型升级。

2023 - 2033 年广西农业生态经济系统安全警情等级为巨警,且高于云南^[20]、贵州,表明广西农业可持续发展状况不容乐观^[38],系统安全调控迫在眉睫。从广西农业生态经济系统安全影响因素分析可以看出,系统安全影响因素是多元的。近年来广西人均耕地面积和耕垦指数均低于云南和贵州,而城镇化率、农业机械总动力、化肥施用量、农业经济密度等均高于云南和贵州;广西人均农业 GDP 高于贵州,人口密度高于云南。这些是引起广西农业生态经济系统安全状态不如云南和贵州的具体原因。因此,广西要坚持生态优先、绿色发展,从多个方面采取措施,例如积极实施乡村振兴战略,严守耕地红线,推进新型城镇化和农业现代化协同发展;扩大生态移民工程,培养农业新型经营主体;加强水土流失、石漠化治理,推广保护性耕作、水肥一体化和高效节水农业。今后应针对广西农业生态经济系统安全调控模式和路径开展深入研究。

4 结论

本研究基于生态足迹模型开展广西农业生态经济系统安全评价、安全影响因素和安全预警研究,主要结论如下。

①2000-2021年广西农业生态经济系统人均生态足迹逐年增加,人均生态承载力波动较小;资源利用效率不断提升,但2011年以来增速明显放缓;系统处于生态赤字状态,且生态压力指数逐渐升高,系统从中度不安全状态转变为重度不安全状态,2021年进入极度不安全状态。

②人均耕地面积和耕垦指数对广西农业生态经济系统安全具有正向影响,影响程度大小为人均耕地面积>耕垦指数;人口密度、人均农业GDP、农业经济密度、城镇化率、化肥施用量、农业机械总动力对系统安全具有逆向影响,影响程度排前2的是人均农业GDP和城镇化率。

③安全预警结果显示,2023-2033年广西农业生态经济系统在极度不安全状态中不断加剧,安全警情为巨警,指示灯变为红色;广西农业生态经济系统安全警情等级高于贵州和云南。

致谢

本文得到了全国哲学社会科学工作办公室的支持,是“农业生态经济系统安全评价与预警研究”系列论文之四。

参考文献

- [1] 骆世明. 农业生态转型态势与中国生态农业建设路径[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(1): 1-7.
- [2] 杜文鹏, 闫慧敏, 甄霖, 等. 西南岩溶地区石漠化综合治理研究[J]. 生态学报, 2019, 39(16): 5798-5808.
- [3] REES W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out [J]. Environment and Urbanization, 1992, 4(2): 121-130.
- [4] WACKERNAGEL M, REES W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: economics from an ecological footprint perspective [J]. Ecological Economics, 1997, 20: 3-24.
- [5] 鲁钰, 赵银娣, 董霁红. 西北地区三维生态足迹生态安全评价及驱动力分析[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1354-1367.
- [6] 柳宏斌, 夏国柱, 林涛, 等. 基于改进生态足迹模型的可持续发展评价: 以北疆为例[J]. 生态学报, 2023, 43(1): 234-248.
- [7] 徐中民, 程国栋, 张志强. 生态足迹方法: 可持续性定量研究的新方法: 以张掖地区 1995 年的生态足迹计算为例[J]. 生态学报, 2001, 21(9): 1484-1493.
- [8] 翁伯琦, 王义祥, 黄毅斌, 等. 福建省生态足迹和生态承载力的动态变化[J]. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2153-2157.
- [9] 潘洪义, 朱晚秋, 崔绿叶, 等. 成都市人均生态足迹和人均生态承载力空间分布差异[J]. 生态学报, 2017, 37(19): 6335-6345.
- [10] 符正平, 麦景琦. 生态省试点与可持续发展能力: 基于生态足迹视角[J]. 中山大学学报(社会科学版), 2021, 61(2): 176-186.
- [11] 刘璐瑶, 张建兵, 龚慧芹, 等. 基于能值-三维生态足迹模型的珠江干流 4 省区资源利用分析及生态补偿研究[J]. 广西科学, 2023, 30(2): 383-393.
- [12] 郝帅, 孙才志, 宋强敏. 基于 ESTDA 模型的中国水生态足迹及水生态压力评价[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 4651-4662.
- [13] 李鹏辉, 张茹倩, 徐丽萍. 基于生态足迹的土地资源资产负债核算[J]. 自然资源学报, 2022, 37(1): 149-165.
- [14] 张翠娟. 基于生态足迹模型的河南省农业生态承载力动态评价[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(2): 246-251.
- [15] 广西壮族自治区统计局. 广西统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [16] 国务院第三次全国国土调查领导小组办公室, 自然资源部, 国家统计局. 第三次全国国土调查主要数据公报[R/OL]. (2021-08-25) [2023-09-30]. https://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202108/t20210826_2678340.html.
- [17] 广西壮族自治区统计局, 国家统计局广西调查总队. 广西壮族自治区国民经济和社会发展统计公报[R/OL]. (2023-03-31) [2023-09-30]. <http://tjj.gxzf.gov.cn/syyw/t16224266.shtml>.
- [18] 李倩, 马姜明. 2009-2018年桂林市生态足迹动态变化与驱动力分析[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2023, 41(4): 178-188.
- [19] 查世凡, 鞠芳妮, 丁云翻, 等. 基于生态足迹法的黑龙江省林场所生态安全研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(36): 15987-15993.
- [20] 李志英, 裴玉力, 陈涛, 等. 基于生态足迹改进模型的云南省生态安全研究[J]. 生态经济, 2022, 38(12): 191-197.
- [21] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001-2022.
- [22] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001-2022.
- [23] 广西壮族自治区统计局. 广西统计年鉴[M]. 北京: 中

- 国统计出版社, 2001-2022.
- [24] 云南省统计局. 云南统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001-2022.
- [25] 贵州省统计局. 贵州统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001-2022.
- [26] WACKERNAGEL M, ONISTO L, BELLO P, et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept [J]. *Ecological Economics*, 1999, 29(3): 375-390.
- [27] 杨开忠, 杨咏, 陈洁. 生态足迹分析理论与方法[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(6): 630-636.
- [28] 兰简琪, 谢世友. 基于生态足迹理论的青岛市水资源可持续分析[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 45(10): 55-62.
- [29] 易其国, 陈慧婷. 基于能值生态足迹和生态效率的贵州省可持续发展评价[J]. *生态经济*, 2021, 37(4): 170-176.
- [30] 杨雪获, 白永平, 车磊, 等. 甘肃省生态安全时空演变特征及影响因素解析[J]. *生态学报*, 2020, 40(14): 4785-4793.
- [31] 赵立君, 杨帆, 王楠, 等. 基于生态足迹模型的贵州省仁怀市可持续发展及其影响因素研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(7): 870-876.
- [32] 徐智超, 刘华民, 韩鹏, 等. 内蒙古生态安全时空演变特征及驱动力[J]. *生态学报*, 2021, 41(11): 4354-4366.
- [33] 高艳珍, 郑庆荣, 罗淑政, 等. 集中连片贫困区耕地安全性评价及影响因素分析: 以忻州市为例[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(5): 919-927.
- [34] 韩磊, 潘玉君, 高庆彦, 等. 基于PSR和无偏GM(1,1)模型的云南省耕地生态安全评价与预测[J]. *生态经济*, 2019, 35(2): 148-154.
- [35] 刘琦, 张俊梅, 张利. 基于GM(1,1)模型的阜平县土地生态安全预警与分析[J]. *林业与生态科学*, 2021, 36(2): 154-161.
- [36] 杨屹, 樊明东. 中国丝绸之路经济带沿线省份生态足迹时空差异及公平性分析[J]. *生态学报*, 2019, 39(14): 5040-5050.
- [37] 柯志成, 连海峰, 陈奕, 等. 福建省2009-2018年人均生态足迹和人均生态承载力的时空动态[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2021, 50(5): 677-685.
- [38] 曹院平. 基于生态足迹模型的广西农业可持续发展评价[J]. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(5): 35-42.

Research on the Safety Evaluation and Early Warning of Guangxi's Agricultural Eco-economic System

ZHANG Yunlan^{1,2,3}

(1. School of Economics and Trade, Guangxi University of Finance and Economics, Nanning, Guangxi, 530003, China; 2. Guangxi Institute of Finance and Economics, Guangxi University of Finance and Economics, Nanning, Guangxi, 530003, China; 3. China - ASEAN School of Digital Economy, Nanning, Guangxi, 530003, China)

Abstract: A long-term series research on safety evaluation, safety influencing factors and safety early warning of Guangxi's agricultural eco-economic system was carried out to provide decision-making references for system safety regulation, agricultural sustainable development and rural revitalization. In this study, the ecological footprint model was used to calculate the per capita ecological footprint and per capita ecological carrying capacity of Guangxi's agricultural eco-economic system from 2000 to 2021. The system safety status was evaluated by resource utilization efficiency index, ecological profit and loss index and ecological pressure index. Partial Least Squares (PLS) model was used to analyze the influencing factors of system safety. Based on the grey GM(1,1) model, the system safety early warning was carried out, and the early warning results were compared with those of Yunnan and Guizhou. The results showed that the per capita ecological footprint of Guangxi's agricultural eco-economic system increased by 90.30% from 2000 to 2021, among which woodland increased the fastest and cultivated land accounted for the largest proportion. The per capita ecological carry-

ing capacity decreased by 0.67%. The utilization efficiency of system resources increased by 72.97%, but the increase was smaller since 2011. The ecological deficit of the system increased from $-0.395 \text{ hm}^2/\text{person}$ to $-1.292 \text{ hm}^2/\text{person}$, and the ecological pressure index increased from 1.66 to 3.18. The system gradually changed from moderate insecurity to severe insecurity, and began to enter extreme insecurity. The per capita cultivated land area and cultivation index had a positive impact on the system's security. From 2022 to 2033, the system's security will change from a severe alarm to a huge alarm, and the alarm level will be higher than that of Guizhou and Yunnan. Therefore, it is necessary to improve the protection of cultivated land, promote the transformation and upgrading of agriculture, and ensure the safety of Guangxi's agricultural ecological economic system.

Key words: agricultural eco-economic system; ecological footprint model; safety evaluation; safety early warning; Guangxi

责任编辑:唐淑芬



微信公众号投稿更便捷

联系电话:0771-2503923

邮箱:gxxk@gxas.cn

投稿系统网址:<http://gxxk.ijournal.cn/gxxk/ch>